

УДК 621.73

**Кухар В.В.<sup>1</sup>, Діамантопуло К.К.<sup>2</sup>****АПРОКСИМАЦІЯ ТРЬОХМІРНИХ ГРАФІЧНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ПАРАМЕТРІВ ФОРМОЗМІНЕННЯ ЗАГОТОВКИ ПРИ ОСАДЖУВАННІ З ВТРАТОЮ СТІЙКОСТІ**

*На підставі запропонованої методики апроксимації поліномами трьохмірних графічних залежностей отримали формули для визначення вивчаємих параметрів формозмінення заготовки, яку осаджують із втратою стійкості. Помилка розрахунків не перевищує 15 %. Це дозволило вдосконалити методику розрахунку заготовки шляхом, розробки узагальненого алгоритму.*

Появу поздовжнього згину при втрачанні заготовкою, що осаджують, стійкості розглядають як зміну умови прикладання деформуючого навантаження з простого (одновісне стискання) на комбіноване (стискання зі згином), через виникнення моменту, що згинає, при випинанні заготовки [1]. Складний характер навантажування зберігається на всьому протязі деформування зі збільшенням складової згину за ходом осаджування.

Будь яку форму втрати стійкості заготовки в технологічних операціях обробки металів тиском прийнято вважати за брак, тому вивчення цього процесу для операції осаджування-висаджування обмежували визначенням критичної величини відношення висоти до діаметру заготовки ( $t_{кр}$ ) і, частково, енергосилових параметрів. Але можливість одержання економного профільованого напівфабрикату під наступне штампування деяких поковок із відростками (типа "вилка кардану" та інш.) способом осаджування відносно високої заготовки з втратою стійкості [2, 3, 8] ставить задачі прогнозування параметрів її формозмінення. Як відзначено в роботі [4], теоретичні методики аналізу процесів комбінованого навантажування розвинуті недостатньо, з чим пов'язані, наприклад, різні значення  $ip_{кр}$ , що визначені, котрі коливаються у межах 2,5...3,79 [5, 6]. Дослідження формозмінення заготовок при складному комбінованому навантажуванні відомими аналітичними методами стає досить проблематичним.

У зв'язку з цим раціональними стають апроксимація даних про параметри формозмінення заготовки, що приведені у роботах [3, 8] та виведення емпіричних формул. Складність заключена в тім, що кожен параметр, який відшукують, є функцією двох

перемінних: відносної висоти заготовки -  $m_0 = \frac{L_0}{D_0}$  (де  $L_0$  і  $D_0$  - висота і діаметр

циліндричної заготовки) та умовного ступеня деформації -  $\epsilon_y = \frac{L_0 - H_k}{L_0} \cdot 100\%$  (де  $H_k$  -

кінцева висота осадженої з втратою стійкості заготовки).

Так графічна залежність відносного скорочення вісі ( $\delta$ ) від умовного ступеня деформації ( $\epsilon_y$ ) та відносної висоти заготовки ( $m_0$ ) приведена на рис. 1.

Будь яку об'ємну діаграму можна представити у вигляді двухмірної проекції на одну з площин із сімейством кривих, форма та розташування кожної з яких залежить від значення третьої перемінної. Таким чином, приведений на рис. 1 трьохмірний графік  $\delta(\epsilon_y, m_0)$  перетворили на плоский (див. рис. 2), як проекцію на фронтальну площину, по горизонтальній вісі якого відкладали  $t_n$ , а по вертикальній - величину  $\delta$ . Чотири кривих графіка рис. 2 відповідають значенням  $\delta$  (у відсотках) при  $\epsilon_y = 13\%$ ;  $27\%$ ;  $40\%$  і  $53\%$ . Розуміється, що при  $\epsilon_y = 0$  для будь яких  $ip_0$  значення  $\delta = 0$ , тому цю геометричну сукупність точок не відображали.

Апроксимацію проводили в Microsoft Office пакеті Excel'97. Кожну експериментальну криву, що відповідає певній  $\epsilon_y$ , апроксимували кубічним поліномом (поліномом третього

ПДТУ, аспірант

" ПДТУ, канд. техн. наук, проф.

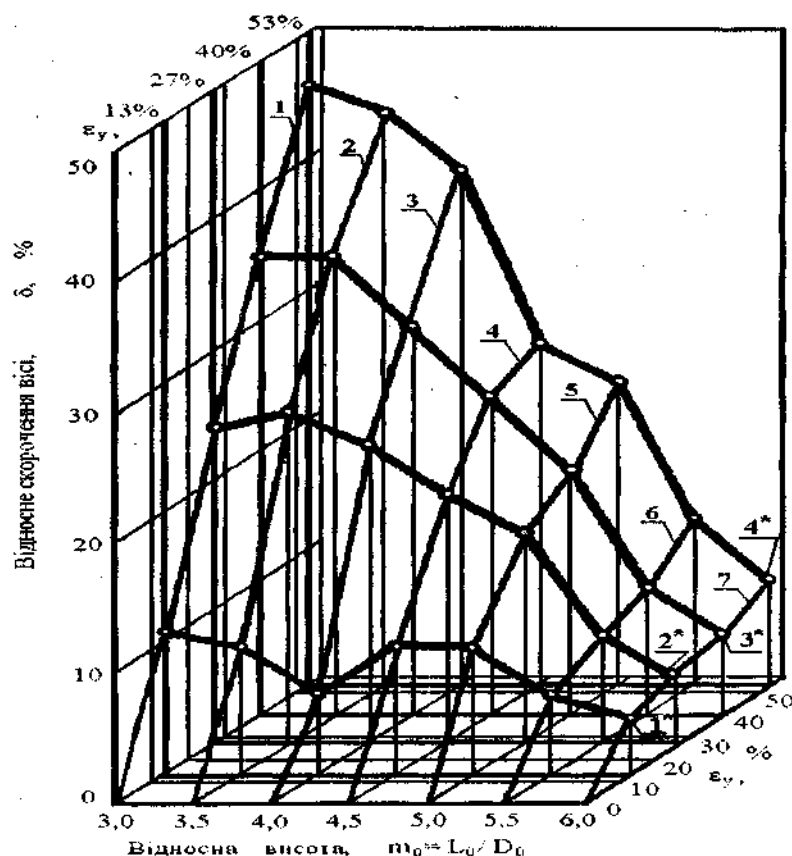


Рис. 1 – Залежність відносного скорочення вісі ( $\delta$ ) зігнутого зразка від ступеню умовної деформації ( $\epsilon_y$ ) та відношення  $L_0/D_0$ :

- 1 –  $L_0/D_0 = 3,0$ ;
- 2 –  $L_0/D_0 = 3,5$ ;
- 3 –  $L_0/D_0 = 4,0$ ;
- 4 –  $L_0/D_0 = 4,5$ ;
- 5 –  $L_0/D_0 = 5,0$ ;
- 6 –  $L_0/D_0 = 5,5$ ;
- 7 –  $L_0/D_0 = 6,0$ ;
- 1\* –  $\epsilon_y = 13\%$ ;
- 2\* –  $\epsilon_y = 27\%$ ;
- 3\* –  $\epsilon_y = 40\%$ ;
- 4\* –  $\epsilon_y = 53\%$ .

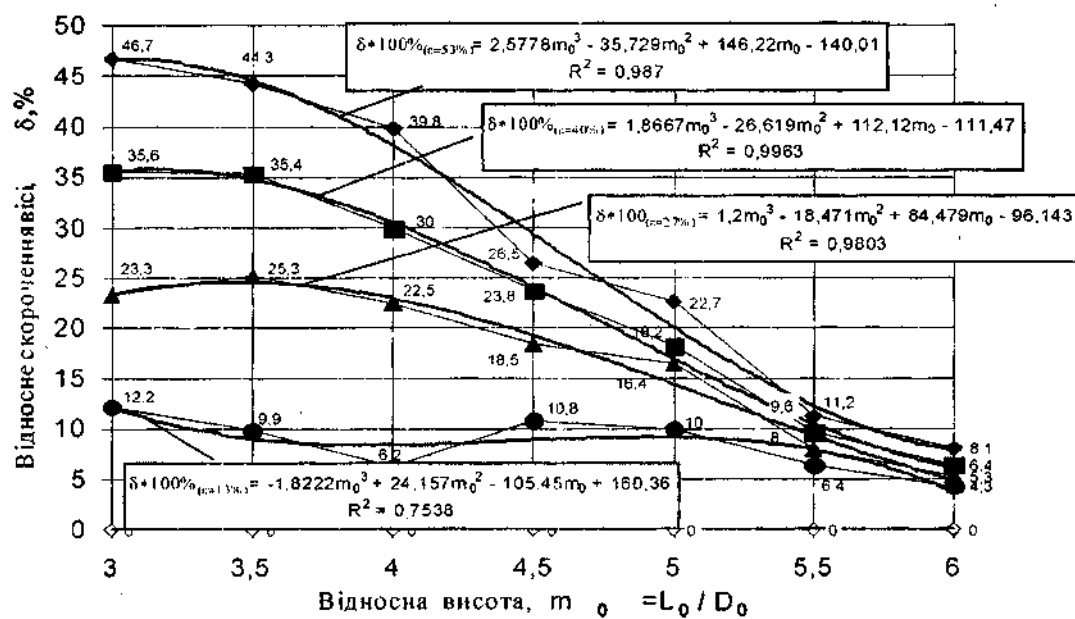


Рис. 2 – Залежність відносного скорочення вісі  $\delta$  від  $L_0/D_0$  при різних значеннях ступеню умовної деформації  $\epsilon_y$  (фронтальна проекція рис.1)

ступеню). Ступінь полінома встановлювали з міркувань оптимального сполучення величин достовірності апроксимації ( $R^2$ ) та форми апроксимуючої кривої, котру підбирали як найбільш імовірну криву для геометричного місця точок, яке розглядається. Отримані поліноми (див. рис.2) звели до одного рівняння, яке в загальному вигляді можна записати як:

$$N = A \cdot m_0^3 + B \cdot m_0^2 + C \cdot m_0 + D, \quad (1)$$

де  $N = N(\varepsilon_y; m_0)$  - параметр, що відшукують (у зазначеному випадку  $N = \delta \cdot 100\%$ );

$A, B, C, D$  - чисельні коефіцієнти, що стоять попереду аргумента полінома та мають певні значення при відповідних  $\varepsilon_y$ .

Виходячи з цього, чисельні коефіцієнти  $A, B, C, D$  уявляли функціонально залежними від умовного ступеня деформації. Графіки  $A(\varepsilon_y), B(\varepsilon_y), C(\varepsilon_y), D(\varepsilon_y)$ , що побудовані, зображені на рис. 3. Застосовуючи аналогічні прийоми апроксимації поліномами, до зазначених графічних залежностей підібрали відповідні поліноми другого ступеня (див. рис.3). Коефіцієнти достовірності апроксимації склали  $R^2 > 0,95$ .

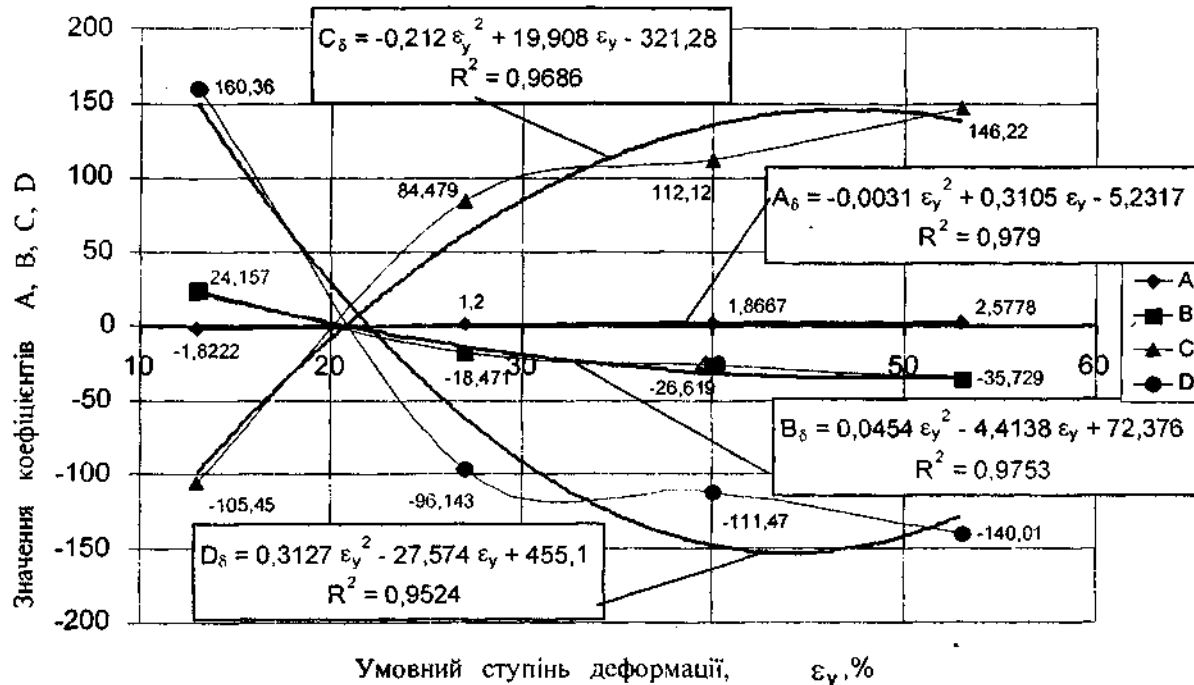


Рис. 3 – Залежність значень коефіцієнтів  $A, B, C, D$  для  $\delta$  від умовного ступеня деформації  $\varepsilon_y$ .

Тоді апроксимуюча функція для  $\delta$ , за рівнянням (1), приймає вигляд:

$$\delta \cdot 100\% = \delta(\varepsilon_y; m_0) \times 100\% = A_\delta \cdot m_0^3 + B_\delta \cdot m_0^2 + C_\delta \cdot m_0 + D_\delta, \quad (2)$$

$$\text{де } A_\delta = -0,0031 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,3105 \cdot \varepsilon_y - 5,2317; \quad B_\delta = 0,0454 \cdot \varepsilon_y^2 - 4,4138 \cdot \varepsilon_y + 72,376;$$

$$C_\delta = -0,212 \cdot \varepsilon_y^2 + 19,908 \cdot \varepsilon_y - 321,28; \quad D_\delta = 0,3127 \cdot \varepsilon_y^2 - 27,574 \cdot \varepsilon_y + 455,1.$$

У запропанованому формулою (2) варіанті розрахунку коефіцієнтів  $A_\delta, B_\delta, C_\delta, D_\delta$  значення  $\varepsilon_y$  треба підставляти у відсотках. У такий самий спосіб підібрали апроксимуючі функції для інших базових параметрів формозмінення заготовки  $\left( \frac{d_{e.sic}}{D_0}, \varphi^0, \frac{B}{L_0}, \lg \frac{r}{D_0} \right)$ , які досліджували у роботах [3, 8]. Отримані рівняння наведені нижче.

Відносний еквівалентний діаметр вісьового поперечного перерізу:

$$\frac{d_{e.sic}}{D_0} = A_d \cdot m_0^3 + B_d \cdot m_0^2 + C_d \cdot m_0 + D_d, \quad (3)$$

$$\text{де } A_d = 0,7794 \cdot \varepsilon_y^3 - 0,6661 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,0898 \cdot \varepsilon_y - 0,0034 \quad (R^2 = 1),$$

$$B_d = -11,432 \cdot \varepsilon_y^3 + 9,858 \cdot \varepsilon_y^2 - 1,526 \cdot \varepsilon_y + 0,0752 \quad (R^2=1),$$

$$C_d = 57,264 \cdot \varepsilon_y^3 - 50,311 \cdot \varepsilon_y^2 + 8,9265 \cdot \varepsilon_y - 0,514 \quad (R^2=1),$$

$$D_d = -97,215 \cdot \varepsilon_y^3 + 87,446 \cdot \varepsilon_y^2 - 16,713 \cdot \varepsilon_y + 2,0905 \quad (R^2=1),$$

значення  $\varepsilon_y$  тут підставляють у відносних одиницях.

Центральний кут  $\varphi$  між відростками (значення  $\varepsilon_y$  тут підставляють у відсотках):

$$\varphi^0 = A_\varphi \cdot m_0^3 + B_\varphi \cdot m_0^2 + C_\varphi \cdot m_0 + D_\varphi, \quad (4)$$

$$\text{де } A_\varphi = -0,0116 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,7758 \cdot \varepsilon_y - 7,0639 \quad (R^2 = 0,9876),$$

$$B_\varphi = 0,1689 \cdot \varepsilon_y^2 - 10,924 \cdot \varepsilon_y + 99,838 \quad (R^2 = 0,9975),$$

$$C_\varphi = -0,7621 \cdot \varepsilon_y^2 + 46,764 \cdot \varepsilon_y - 431,43 \quad (R^2 = 0,9999),$$

$$D_\varphi = 1,0795 \cdot \varepsilon_y^2 - 63,229 \cdot \varepsilon_y + 770,6 \quad (R^2=0,9999).$$

Відносний габаритний прогин (значення  $\varepsilon_y$  тут підставляють у відносних одиницях):

$$\frac{B}{L_0} = A_B \cdot m_0^3 + B_B \cdot m_0^2 + C_B \cdot m_0 + D_B, \quad (5)$$

$$\text{де } A_B = 0,7344 \cdot \varepsilon_y^3 - 0,5263 \cdot \varepsilon_y^2 + 0,0838 \cdot \varepsilon_y - 0,0023 \quad (R^2=1),$$

$$B_B = -7,632 \cdot \varepsilon_y^3 + 4,898 \cdot \varepsilon_y^2 - 0,5645 \cdot \varepsilon_y + 0,017 \quad (R^2=1),$$

$$C_B = 22,12 \cdot \varepsilon_y^3 - 10,772 \cdot \varepsilon_y^2 - 0,1604 \cdot \varepsilon_y - 0,0182 \quad (R^2=1),$$

$$D_B = -13,589 \cdot \varepsilon_y^3 - 1,7229 \cdot \varepsilon_y^2 + 4,9814 \cdot \varepsilon_y + 0,1565 \quad (R^2=1).$$

Відносний внутрішній радіус (у логарифмічній формі):

$$\lg\left(\frac{r}{D_0}\right) = A_r \cdot m_0^3 + B_r \cdot m_0^2 + C_r \cdot m_0 + D_r, \quad (6)$$

$$\text{де } A_r = 12,207 \cdot \varepsilon_y^3 - 14,193 \cdot \varepsilon_y^2 + 4,6031 \cdot \varepsilon_y - 0,6001 \quad (R^2=1),$$

$$B_r = -159,39 \cdot \varepsilon_y^3 + 187,01 \cdot \varepsilon_y^2 - 60,639 \cdot \varepsilon_y + 8,1419 \quad (R^2=1),$$

$$C_r = 684,87 \cdot \varepsilon_y^3 - 812,76 \cdot \varepsilon_y^2 + 264,59 \cdot \varepsilon_y - 37,055 \quad (R^2=1),$$

$$D_r = -1026,1 \cdot \varepsilon_y^3 + 1229,3 \cdot \varepsilon_y^2 - 408,34 \cdot \varepsilon_y + 59,923 \quad (R^2=1),$$

значення  $\varepsilon_y$  тут підставляють у відносних одиницях ( $r$  - внутрішній радіус).

Помилка обчислювань за формулами (2) – (6) у межах  $m_0 = 3,0 \dots 6,0$  і  $\varepsilon_y = 13 \dots 53$  % не перевищує 15 %. Але їх громоздкість може викликати труднощі при прямому застосуванні для інженерних розрахунків. Тому визначення параметрів формозмінення заготовки доцільно комп'ютеризувати.

Отримані результати дозволяють удосконалити методику [3] розрахунку заготовки й потрібних технологічних параметрів при проектуванні процесів виготовлення за новою технологією поковок типа "вилок кардану" тощо. Кінцевою метою розрахунку циліндричної заготовки є визначення її діаметра ( $D_0$ ) та довжини ( $L_0$ ). При цьому, в якості технологічного параметра, повині визначити значення  $\varepsilon_y$ , яке дозволить досягнути бажаних (для проектуемого варіанту подальшого штампування) особливостей форми напівфабрикату.

Вихідними даними для розрахунку є конфігурація поковки ( $\varphi^0, B$  - габаритний прогин, та ін.) та характеристики епюри діаметрів, що будують [7]:  $V_e$  - об'єм епюри,  $L_e$  - довжина епюри діаметрів,  $D_{e \max}$  і  $D_{e \text{ сяр}}$  - максимальний і середній діаметри епюри, тощо. Епюру

будують для поковки в розвернутому вигляді. Скорочення вісі  $\delta$  (у відносних одиницях), яке відбудеться в наслідок осаджування з втратою стійкості заготовки для забезпечення співпадіння довжини її розвертки і  $L_e$ , залежить від довжини заготовки [7]:

$$\delta = 1 - 0,926 \frac{L_e}{m_0 \cdot 3 \sqrt{\frac{V_e}{m_0}}} \quad (7)$$

Завдаючи  $m_0$ , за формулою (7) визначають потрібне  $\delta$ . При цьому, за даними [2, 3, 7]:

$$1,28 \frac{V_e}{D_{e,cep}^3} (m_0 \leq 6,0) \quad (8)$$

Значення  $m_0$  беруть у інтервалі (8) із кроком  $s \approx 0,01$  і проводять обчислювання (7). Формулу (2) привели до вигляду (9), щоб, через задані  $m_0$  і  $\delta$ , визначити  $\varepsilon_y$ :

$$A_1 \cdot \varepsilon_y^2 + A_2 \cdot \varepsilon_y + A_4 = 0, \quad (9)$$

де  $A_1 = -0,0031 \cdot m_0^3 + 0,0454 \cdot m_0^2 - 0,212 \cdot m_0 + 0,3127$ ,

$$A_2 = 0,03105 \cdot m_0^3 - 4,4138 \cdot m_0^2 + 19,908 \cdot m_0 - 27,574,$$

$$A_4 = A_3 - \delta \cdot 100\%, \quad \text{тут } A_3 = -5,2317 \cdot m_0^3 + 72,376 \cdot m_0^2 - 321,28 \cdot m_0 + 455,1.$$

Вираз (10) розрішують відносно  $\varepsilon_y$  як квадратне рівняння. З отриманих значень  $m_0$  і  $\varepsilon_y$ , за формулою (4) визначим коефіцієнт  $\frac{d_{e,сic}}{D_0}$ . Тоді розміри початкової циліндричної заготовки:

$$D'_0 = \frac{D_{e,max}}{\left( \frac{d_{e,сic}}{D_0} \right)} \quad \text{та} \quad L'_0 = \frac{V_e}{0,785 \cdot D_0^2} \quad (11)$$

Діаметр заготовки слід відкоректувати на ГОСТ 2590 – 88. Розрахунки (7) – (11) повторяють з уточненим значенням  $m_0$ . Параметри форми визначають з (3) – (6) та порівнюють із відповідними характеристиками поковки. Остаточні розміри заготовки та  $\varepsilon_y$  вибирають при оптимальному співпадінні домінуючих для використовуваного варіанта штампування геометричних параметрів напівфабрикату й поковки з ряду отриманих значень. Узагальнений алгоритм розрахунку заготовки наведено на рис. 4.

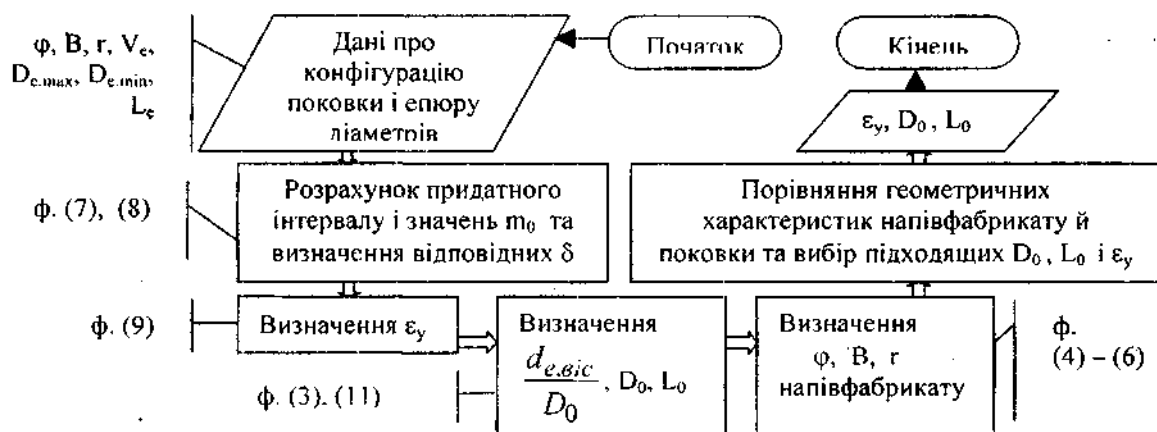


Рис. 4 – Узагальнений алгоритм розрахунку заготовки й базові формули (за текстом статті)

За цим алгоритмом складено програму, яка вдосконалюється з точки зору мінімізації часу на розрахунок та оптимізації геометричних параметрів напівфабрикату, що одержують. За розробленою методикою, з використанням одержаних у роботі рівнянь, виконані проектувальні

розрахунки для поковки “вилка кардану” (маса 1,64 кг, Сталь 40 ХН, виробництво Херсонського заводу карданих валів – ХЗКВ) із наступними вихідними даними:  $\varphi = 90^\circ$ ,  $B = 112$  мм,  $r$  не лімітується (штампування плашмя),  $D_{e, \max} = 54$  мм,  $D_{e, \text{сер}} = 39,7$  мм,  $L_e = 180$  мм,  $V_e = 271909$  мм<sup>3</sup>. Отримані оптимальні результати:  $L_0 = 217$  мм і  $D_0 = 41$  мм (тобто маса заготовки –  $M_{\text{заг}} = 2,25$  кг),  $\epsilon_y = 32$  %, тоді як за технологією ХЗКВ –  $M_{\text{заг}} = 2,78$  кг (майже на 20 % більше). Це підтверджує, що використання осаджування з втратою стійкості заготовки в якості профільуючої операції сприяє суттєвому <sup>Висновки</sup> заощадженню металу.

1. Трьохмірні графічні залежності з сімейством кривих можливо апроксимувати одним рівнянням. Методика, що викладена, дозволяє отримувати аналітичні залежності за результатами багаторівневого експерименту для даних із недостатньо розробленою теоретичною основою, що відноситься до формозмінення заготовки при осаджуванні з втратою стійкості. Розходження розрахунків за одержаними рівняннями з експериментальними даними не перевищує 15 %.
2. Отримані рівняння дозволяють розробити узагальнений алгоритм, комп'ютеризувати і удосконалити методику розрахунку заготовки для технологічних процесів виготовлення деяких поковок машинобудівного призначення із застосуванням осаджування з втратою стійкості на стадії одержання профільованого напівфабрикату.

#### Перелік посилань

1. Снитко Н.К. Устойчивость стержневых систем в упруго-пластической области. - Л.: Госстройиздат, 1968. - 248 с.
2. Рішення про видачу патенту на винахід (від 27.11.2000). Україна, МІЖ 7 В21К1/08, В21К1/12. Спосіб виготовлення вісесиметричних поковок з відростками / Діамантопуло К.К., Кухар В.В. - № 99041929; Заявл. 06.04.1999.
3. Діамантопуло К.К., Кухарь В.В. Новая методика расчета заготовки для штамповки поковок типа «фланец кардана» // Защита металлургических машин от поломок: Сб.науч.тр. - Мариуполь, ПГТУ, 1998. - Вып.3. - С 257 - 265.
4. Анализ напряженно-деформированного состояния заготовки в процессах осесимметричной штамповки осадкой с кручением / Смирное С.М., Ершов А.Н., Чумаченко С.Е., Кропотов В.А. // Кузнечно-штамповочное производство. - 1998. - №6. - С. 9-12.
5. Грайфер А.Х. Об устойчивости заготовок при осадке и высадке // Кузнечно-штамповочное производство. - 1970. - №1 1. - С. 11-13.
6. Тимошенко В.А., Ермилов В.В. Безоблойная штамповка поковок с изогнутой осью. - Кишинев: Щтиинца, 1980. - 82 с.
7. Кухарь В.В., Діамантопуло К.К. Аналитическое определение граничных технологических параметров при профилировании заготовки осадкой с потерей устойчивости // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: 36.наук.праць. - Краматорськ-Слов'янськ, ДДМА, 2000. - С. 196-199.
8. Діамантопуло К.К., Кухарь В.В. Исследование осадки с потерей устойчивости заготовки для приближения её формы к форме поковки // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: 36.наук.праць. - Краматорськ, ДДМА, 1999. - С 71-74.

**Кухар Володимир Валентинович.** Аспірант кафедри ковальсько-штампувального виробництва Приазовського держтехуніверситету, закінчив Приазовський державний технічний університет у 1999 році. Основні напрямки наукових досліджень - оптимізація технологій одержання заготовок та техпроцесів гарячого об'ємного деформування.

**Діамантопуло Костянтин Костянтинович.** Канд. техн. наук, професор кафедри ковальсько-штампувального виробництва Приазовського держтехуніверситету, закінчив Ждановський металургійний інституту 1970 році. Основні напрямки наукових досліджень - удосконалення технологій заготівельного виробництва і процесів штампування, розробка універсального гідроприводу машин ударної дії.

Статья поступила 05.02.2001.